

デジタルホログラフィにおける距離計測技術の確立と 三次元物体の表面ひずみ分布計測への応用

Establishment of Distance Measurement Technique and Application to Surface Strain Distribution Measurement of 3D Object

システム工学部：○藤垣元治、松井徹、森本吉春

M. FUJIGAKI, T. MATUI, Y. MORIMOTO

○印研究代表者連絡先：fujigaki@sys.wakayama-u.ac.jp、電話073-457-8176
本研究に関連するホームページURL：<http://hamachi.sys.wakayama-u.ac.jp/>

要約： 本研究の目的は、デジタルホログラフィによって三次元形状を持つ物体の表面ひずみ分布を計測する手法を開発することである。三次元物体の表面ひずみ分布を計測するためには、各点の法線方向を知る必要がある。法線方向は物体の形状から求めることができるため、本研究では、まず三次元形状計測対象物体の距離分布を計測する技術を確認し実験的に確認した。次にその手法を三次元物体の表面ひずみ分布計測に適用した。

1. はじめに

デジタルホログラフィは、鏡面以外のほとんどすべての物体に対して、表面処理をする必要がなく、非接触で変位分布・ひずみ分布が計測できる最近注目されている新しい計測手法である。しかし、スペックルノイズが多いことや、計算プログラムが複雑なことから、一般には基礎研究までしか行われていない。しかし我々は、これまでにスペックルノイズの影響を除去する手法を提案し、サブナノメートルの分解能で変位分布を得る手法を世界にさがけて開発した。その手法を応用し、これまでに、ひずみ分布が計測できる実用型の可搬型システムを試作することができた。

試作装置をより実用的な現場で使いやすいものにするためには、小型軽量化だけでなく、ソフトウェアが使いやすいことや、作業時間が短いこと、計測対象物の位置合わせが容易であることなどが求められる。

計測対象物が平面状の場合、計測装置に対して完全に正面に向けることはできず、どうしてもある程度の傾きを持つ。また、計測対象物が三次元的な形状を持つ場合、法線方向が場所ごとに異なることになる。そのため、各点の法線方向を計測し、計測対

象物の表面の面内方向のひずみに換算する必要がある。そのためには、計測対象物の三次元形状を計測する必要がある。

本研究では、装置を複雑にせずに、デジタルホログラフィの光学系を用いたままで距離計測を行うことができる手法の研究を行った。まず三次元形状計測対象物体の距離分布を計測する技術を確認し実験的に確認した。次にその手法を三次元物体の表面ひずみ分布計測に適用した。本研究を実施することによって、デジタルホログラフィを用いて三次元物体の形状計測を行う方法を実証することができた。試作装置についても、ソフトウェアを製作することによって、校正に必要な作業時間を大幅に短縮できて使いやすいものをつくった。これにより、試作装置をより実用的なものに近づけることができた。

今後は、本計測装置の技術移転を進めていくとともに、本研究成果を応用して、これまでよい手法がなかったマイクロ構造物の力学的特性評価が行えるようにしていく。

2. 格子投影による形状計測

2. 1 形状計測原理

光源に平行光を用いる場合の光源とカメラと物体

の位置関係を図1に示す．直線MNはCCDカメラのある1画素の視線を表し，直線MOは格子の同一部分（等しい位相を持つ部分）を表している．基準面 $z=z_0$ の位置での位相分布を ϕ_0 とし，投影格子のピッチ N とする．直線MNでは投影格子の位相が高さ z に対して線形に変化するとすると，物体を設置して得られた位相分布を ϕ とすると物体の高さ分布は，

$$z = \frac{N(\phi - \phi_0)}{2\pi \sin \theta} + z_0 \quad (1)$$

と表わせる．ここで， θ は投影格子の入射角を表す．

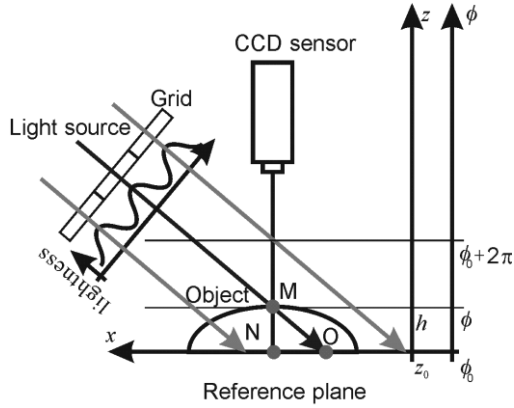


図1 Principle of shape measurement

2. 2 変位計測原理

図5に示すように物体に対して同一平面から等しい入射角 θ で光を照射する．ここでは xz 平面内について考える．点Qの変位ベクトル d は，光源から物体までの距離 L_1Q , L_2Q に比べて十分に小さいため，線分 L_1Q と L_1Q' , L_2Q と L_2Q' はそれぞれ互いに平行であるとみなせる．同様に，線分 QO と $Q'O$ も平行とみなせる．物体から光源1，物体から光源2，物体から観測点の単位ベクトルをそれぞれ i_1 , i_2 , i_0 とすると，2つの光路 L_1QO と $L_1Q'O$, L_2QO と $L_2Q'O$ の差 Δl_1 , Δl_2 は，

$$\begin{aligned} \Delta l_1 &= d \cdot i_1 + d \cdot i_0 = d \cdot (i_1 + i_0) \\ \Delta l_2 &= d \cdot i_2 + d \cdot i_0 = d \cdot (i_2 + i_0) \end{aligned} \quad (2)$$

と表わせる．変位ベクトル d の x 方向成分を d_x ， z 方向成分を d_z とし，式(2)の連立方程式を解くと，

$$\begin{aligned} d_x &= \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{(\Delta \phi_1 - \Delta \phi_2)}{\sin \theta} \\ d_z &= \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{(\Delta \phi_1 + \Delta \phi_2)}{(\cos \theta + 1)} \end{aligned} \quad (3)$$

と表わせ， x 方向と z 方向の変位量をそれぞれ求めることができる．

2. 3 実験

実験に用いる本研究で提案した形状および変位を計測する光学系を図3に示す．光源には，出力5 mW，

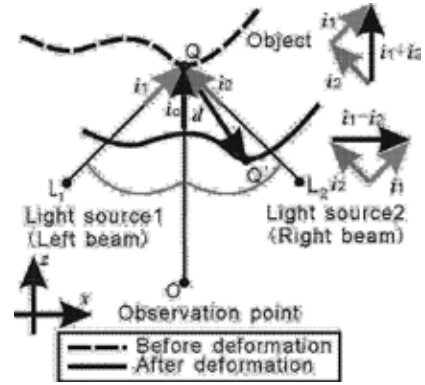


図2 Principle of displacement measurement

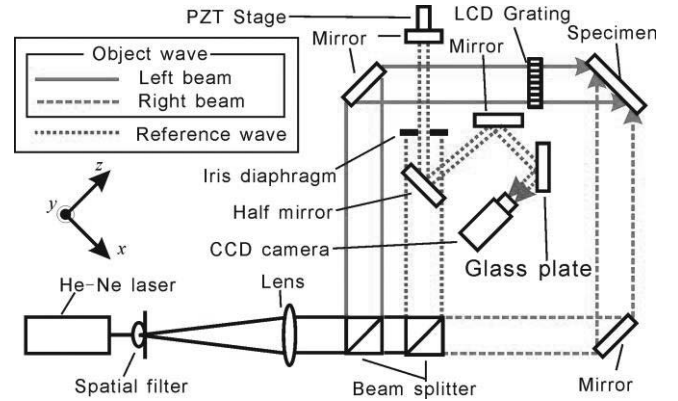


図3 Optical system for experiment

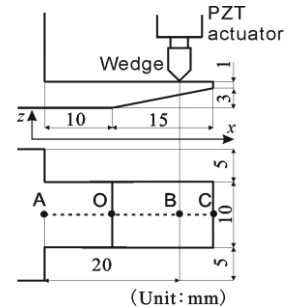


図4 Specimen

波長632.8 nmのHe-Neレーザを用いた．CCDカメラの1画素の大きさは $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ で，取り込む画像の画素数は，960画素 \times 960画素，濃度段階は256階調とする．図4のような傾きを持つ片持ち梁を計測試料とした．

2. 4 形状計測実験

図3の光学系を用いて，図4の計測試料の形状計測を行った．基準面と計測試料に照射した投影格子の位相分布を求めるために投影格子の位相を $\pi/2$ ずつシフトし，4組のデジタルホログラムを撮影する．4組のデジタルホログラムを再生距離340 mmで再生すると，物体表面に投影された格子パターンが再生像として得られる．これらの再生像に対して位相解析を行う．ただし格子を投影させる光源にレーザ光を用いるため，スペックルが発生し強度分布が正弦波にならず精度よい位相解析ができない．ここでホログ

ラムに窓関数をかけるノイズ除去手法（後述）を適用した．このようにして得られた基準面と計測試料の位相分布を図5に示す．図6に示すこれらの位相の差に式(1)を用いて，計測試料の高さ分布を求める．図4の計測試料の1ラインABにおける高さ分布は図7のようになり，図面上での値との誤差平均は0.01 mm，標準偏差は0.12 mmの精度で高さ分布の計測ができた．

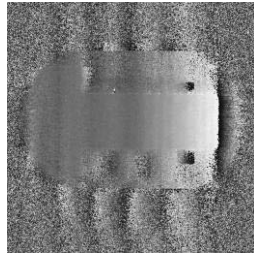
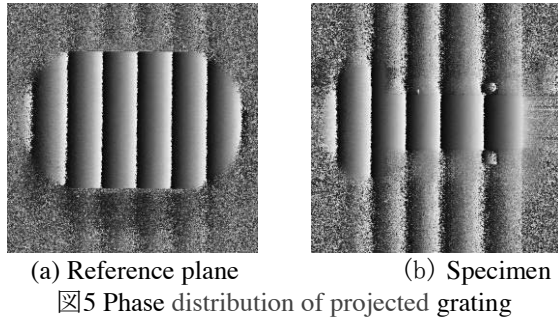


Fig. 6 Phase-difference distribution

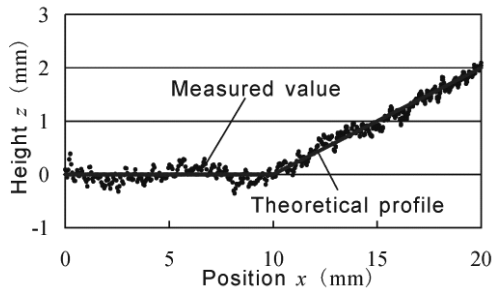


図7 Height distribution

2. 5 法線方向および接線方向の変位算出

図7の高さ分布から物体の傾きを求め，変位分布を図8に示すように物体の法線方向と接線方向に換算する．図4の計測試料の1ラインOBに最小2乗法を用いて試料の傾きを求めると0.194と図面上での値との誤差3%で計測できた．この傾きを用いて法線方向と接線方向に換算すると図9に示すように変位換算ができた．

3. 2 波長を用いた高さ分布計測

3. 1 原理

物体に平行光を照射したとき，物体の高さとの光源の波長の変化によって生じる位相差の関係を図 10

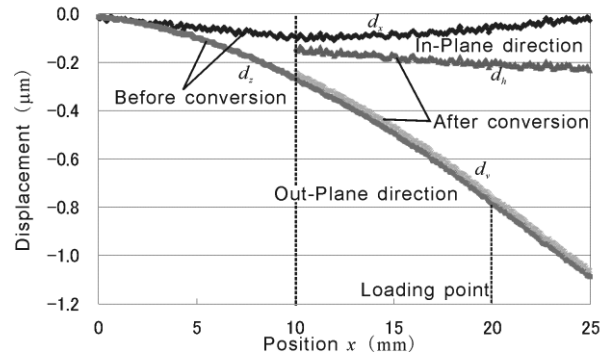
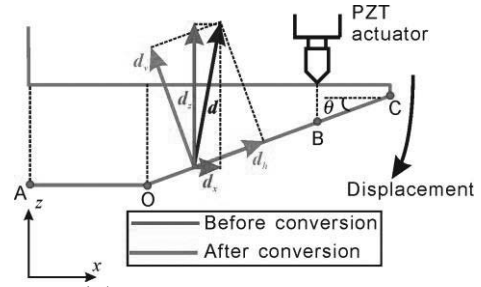


図9 Displacement distribution after conversion

に示す．波長を λ_1 から λ_2 に変化させたときに生じる位相差を $\Delta\phi$ とする．

ここで，Fig. 11 のようなトワイマン・グリーン型の光学系では，物体の高さ分布に対する往復の位相差を考慮にいれる必要があるので， $z=h_0$ のとき $\Delta\phi=\Delta\phi_0$ ， $z=h_1$ のとき $\Delta\phi=\Delta\phi_1$ とすると

$$\Delta h = h_1 - h_0 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4\pi(\lambda_2 - \lambda_1)} (\Delta\phi_1 - \Delta\phi_0) \quad (4)$$

となる．また λ_1 ， λ_2 の値が未知であっても Δh が既知の物体でキャリブレーションを行えば物体の形状を計測することができる．

3. 2 位相差平均化手法（窓関数を用いたスペックルノイズ除去手法）

位相差平均化手法とは，窓関数を用いたスペックルノイズの低減手法である．ホログラムには，冗長性があり，ホログラムの一部からでも全体を再生することができる．ホログラムの再生像はスペックルで構成されており，ホログラフィに窓関数をかけて分割したものを再生すると，スペックルの位置が移動する．また，スペックルの輝度の高いところはノイズが少ないという特徴がある．位相差平均化手法では，変化前後のホログラムに同じ窓関数をかけて分割したものを再生し，複数の位相差分布を求める．このようにして得られた複数の位相差分布に対して，強度分布を重みとした平均をとるとスペックルノイズが低減された位相差分布を得ることができる．

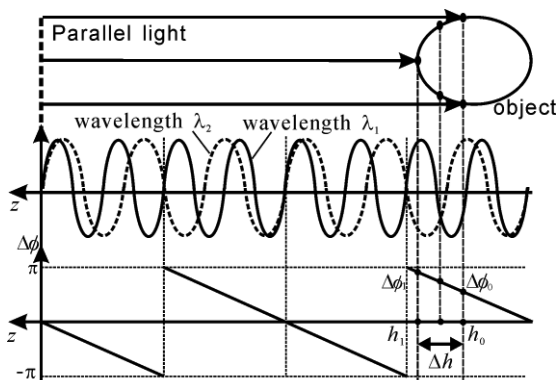


Fig. 10 Relationship height z and phase distribution with wavelength shift

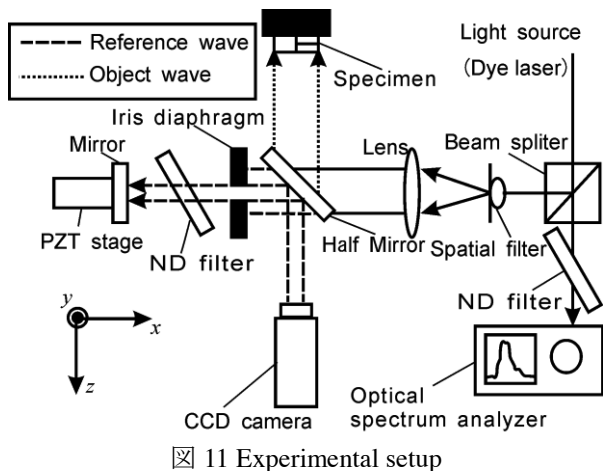


Fig. 11 Experimental setup

3. 3 実験

図 11 に示す光学系を用いて高さ分布計測の実験を行った。光源には色素レーザを用いた。実験に用いた色素レーザはステッピングモータで、共振器内の光路長を調節することで、波長を変えることができる。図 12 に示す計測試料の形状を計測する。CCD 素子からの距離 213 mm の位置に図 12 に示す計測試料を設置した。色素レーザのステッピングモータを 10 step 回転させ、波長の変化前後のホログラムをそれぞれ撮影する。またそのときの光源の波長を光ス

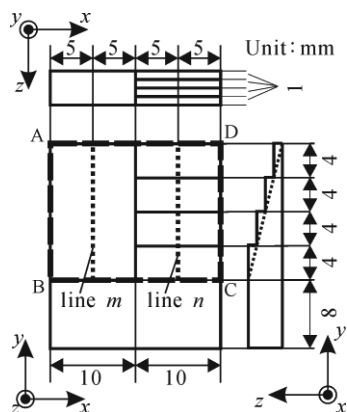


Fig. 12 Specimen

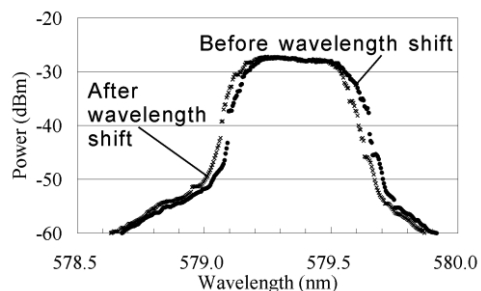
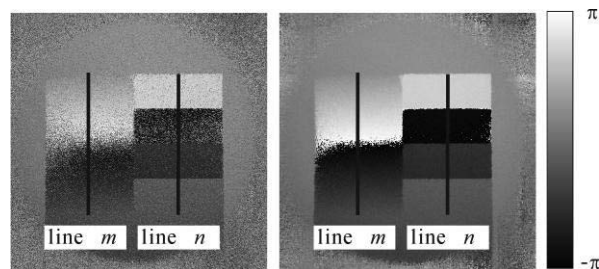
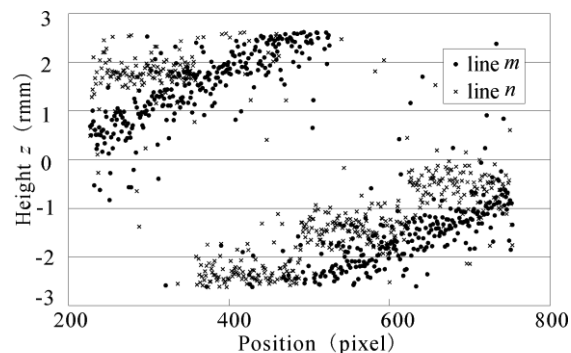


Fig. 13 Spectrum of light source

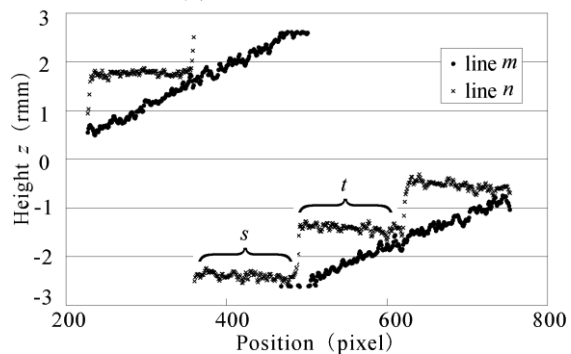


(a) Before noise-reduction (b) After noise-reduction

Fig. 14 Phase-difference distribution



(a) Before noise-reduction



(b) After noise-reduction

Fig. 15 Height value on line m and line n

ペクトラムアナライザで測定した。波長の測定結果は図 13 のようになった。

図 13 のグラフの強度が -50 dBm 以上の部分で波長の変化前後のスペクトラムの相関を取って、波長の変化量を求めた結果 0.032 nm となった。波長の変化前の波長は強度が -50 dBm 以上の部分の重心を求めた結果 579.4 nm となった。光源の波長の変化によって得られた位相差分布を図 14 (a) に示す。また窓関

数を用いたスペックルノイズ低減手法でノイズを低減した位相差を図14(b)に示す。図14のline m , line n の位相差の値を抜き出して式(4)に代入すると図15のような結果が得られた。この場合、位相接続を行っていないので、左半分が上方に現れている。図15(b)の s の部分と t の部分の差をとると 0.98 mm となった。図面上の値は 1.0 mm なので、スペックルノイズ低減手法によって、高さ分布の計測ができていえる。また図14(b)を位相接続し、line m の近似直線を最小2乗法で求める。実験値とその近似直線との標準偏差は 0.09 mm となった。

4. スペックルパターンの標準偏差を用いる距離検出手法の適用可能範囲の検討

位相シフトデジタルホログラフィを用いて変位計測を精度よく行うには、計測物体と CCD までの光学的距離(再生距離)を精度よく求める必要がある。最適な再生距離を得る手法として、再生像のある領域での強度分布の標準偏差が極大となる位置を求めることで適正な再生距離が得られることを実験的に見出した。本研究ではレンズを用いて拡大・縮小を行った場合においてもこの手法によって再生距離が検出できることを確認する。さらに、そのメカニズムを解明するために、スペックルの大きさと標準偏差の関係について検討した。

4. 1 再生像の標準偏差の算出

再生像の強度の標準偏差 P_S は再生像の全画素数を N 、全画素の平均強度 \bar{P}_A 、各画素での強度 P_i とすると式(5)のように表すことができる。再生距離を順次変えて再生を繰り返し、再生像の強度の標準偏差が極大となる位置から最適な再生距離を検出する。

$$P_S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (P_i - \bar{P}_A)^2} \quad (5)$$

4. 2 レンズを用いた光学系による再生距離計測実験と結果

図16に実験で用いた光学系を示す。光源は出力8 mW、波長632.8 nmのHe-Neレーザを用いる。CCDカメラは1画素の大きさが $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、取り込む画像の画素数は 960×960 画素で、濃度段階は256階調とする。計測物体は図17に示す平板である。図18に実験の再生像を示し、計測手法により照射領域で解析を行い最適な再生距離を検出する。

実験結果を図19に示す。物体の前方に焦点距離200 mmの凸レンズと80 mmの凹レンズを配置することによって再生距離が変化する。屈折による光学距離の変化を考慮し、像からCCDまでの距離を計算

すると323.7 mmとなる。上述の手法によって得られた最適な再生距離は324.2 mmとなった。理論値と計測結果の差は0.5 mmであった。

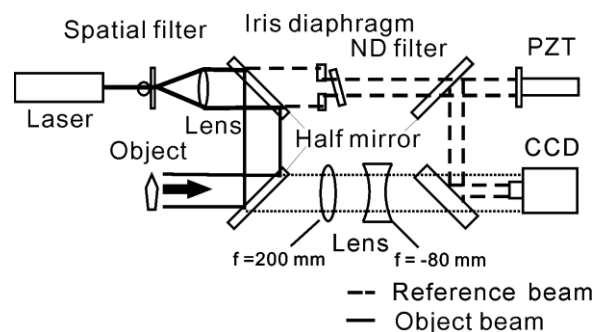


図16 Optical setup

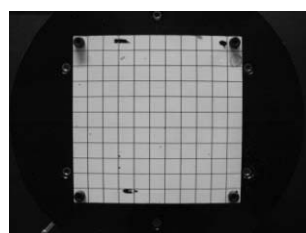


Fig. 17 Specimen



Fig. 18 Reconstructed image

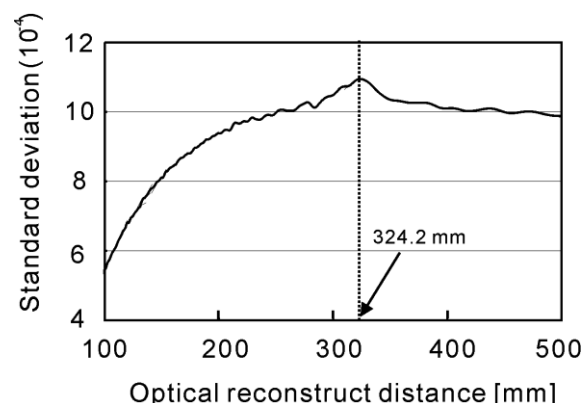


図19 Relationship between standard deviation and reconstruct distance

4. 3 再生距離とスペックルの大きさの関係

標準偏差による距離検出手法の確認実験を行ったがその理論についてはまだ明確にされていない。そこで、本章では再生距離を順次変化させ再生像のスペックルにどのような変化が生じているかを検証した。再生像を拡大すると、スペックルは図20に示すような像となっていることがわかる。スペックルの



図20 Expanded reconstructed image

個数を数えることにより密度を求め、それをもとの大きさ比較した。スペックルの粒子のサイズが大きくなると、粒子間の間隔が広くなり、そのため密度が低くなる。

実験で用いる光学系を図21、計測資料を図22に示す。光源は、最大出力8 mW、波長632.8 nmのHe-Neレーザを用いる。また、光学距離の計算を省くために、膜厚2 μm ペリクルビームスプリッターを用いる。ホログラムの記録には、1画素の大きさが4.65 $\mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ のデジタルインターフェースのカメラ (SONY, XCD-SX910)を用いる。画像の取り込みは、デジタルインターフェースボードを取り付けた計算機を使用する。また、取り込む画像の画素数は、960画素 \times 960画素で濃度段階は256階調とする。得られた再生像に対し前節の塗りつぶし処理を用いて領域内のスペックルを数える。

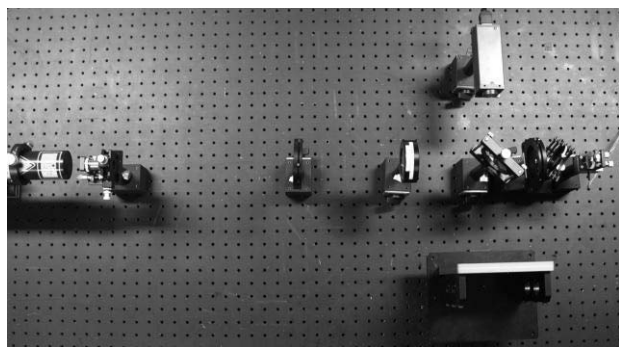
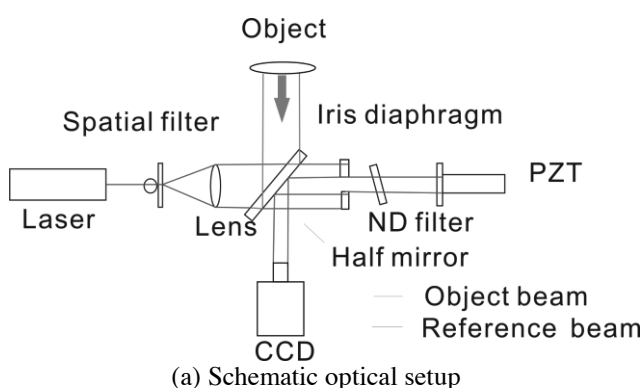


図21 Optical setup

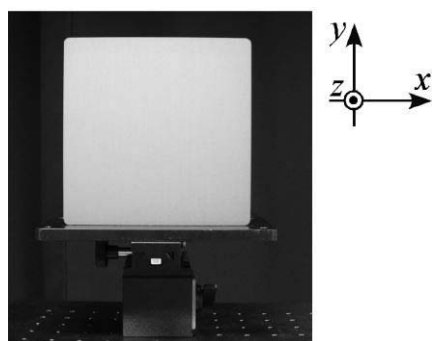


図22 Specimen

前節と同様に再生距離と標準偏差の関係を図23に示す。図23より最適再生距離は249.1 mm となる。2値化した再生像を図25の(a), 1画素となった再生像を(b)に示す。図24の400 \times 400画素で囲まれた領域のスペックルを数えた結果を図25にあらわす。

図25より再生距離に応じてスペックルの間隔が変化し、最適な再生距離に近づくにつれスペックルの間隔が狭くなっていることが確認できた。

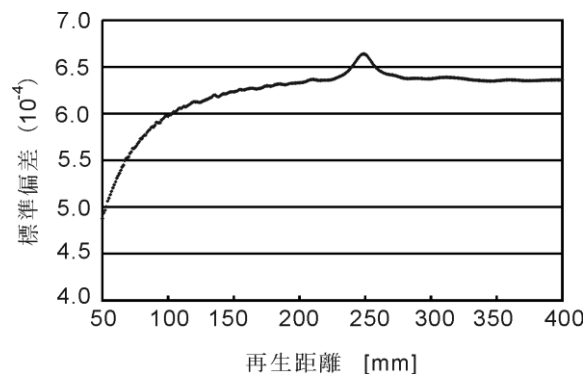


図23 Relationship between standard deviation and reconstruct distance

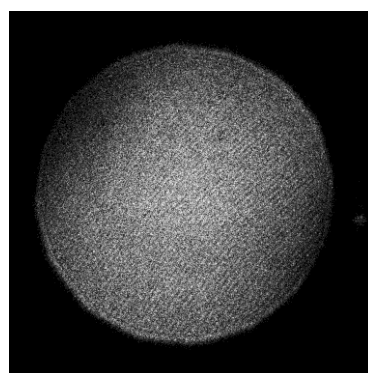


図24 Reconstructed image (249.1 mm)

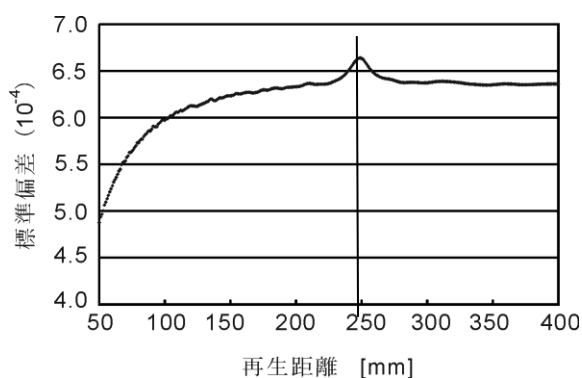


(a) Binarized speckle image

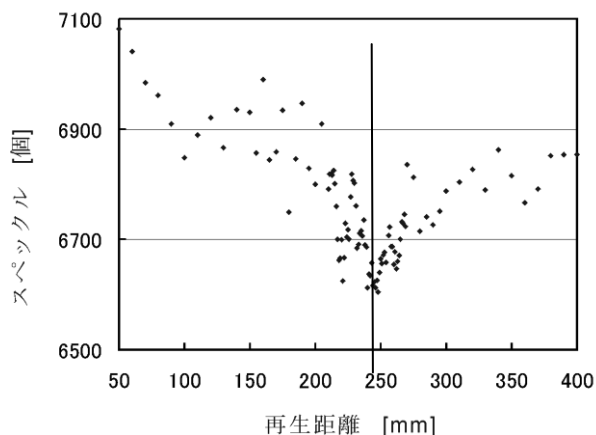


(b) converged point image

図25 Expanded speckle image



(a) Relationship between standard deviation and reconstruct distance



(b) Relationship between standard deviation and number of speckle

図26 Relationship among standard deviation and reconstruct distance, number of speckle

5. デジタルホログラフィ研究用ソフトウェアの開発

5. 1 簡易計算サーバの構築

簡易計算サーバの構成を図27に示す。外部のコンピュータからインターネットを経由して、計算サーバに処理をさせることができる。1台の親ノードに複数台の子ノードがHUBを経由してLANで接続されている。この計算サーバの処理の流れの概略図を図28に示す。まず親ノードは外部のコンピュータから処理命令と処理対象のデータを受け取る。つぎに処理命令を受けた親ノードは複数の子ノードに処理を分散させる。親ノードから子ノードの処理命令の送受信およびデータの受け渡しは、子ノードのHDを経由して行う。OSのフォルダの共有機能によって親ノードからでも子ノードのHDへファイルの読み書きができるようにする。処理命令の送受信はテキストファイルの読み書きによって行う。子ノードが待機状態にあるとき、親ノードからの処理命令書き込むテキストファイルを監視し、処理命令の有無を調べる。最後に親ノードはそれぞれの子ノードに分散させた処理の結果をまとめて、外部のコンピュータに出力する。このような手法を用いることで、並列処

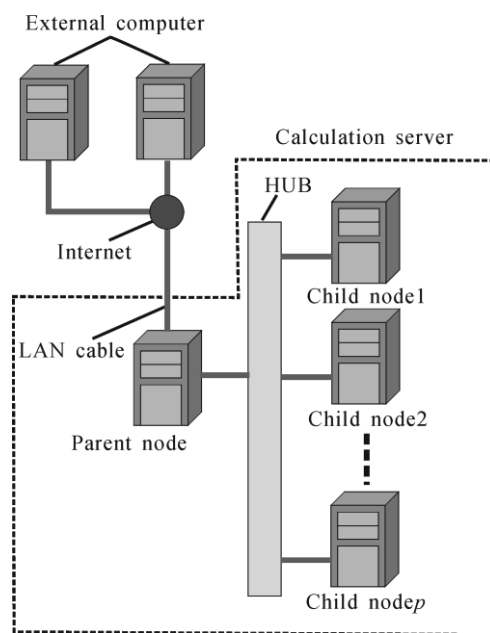


図 27 Structure of calculation server

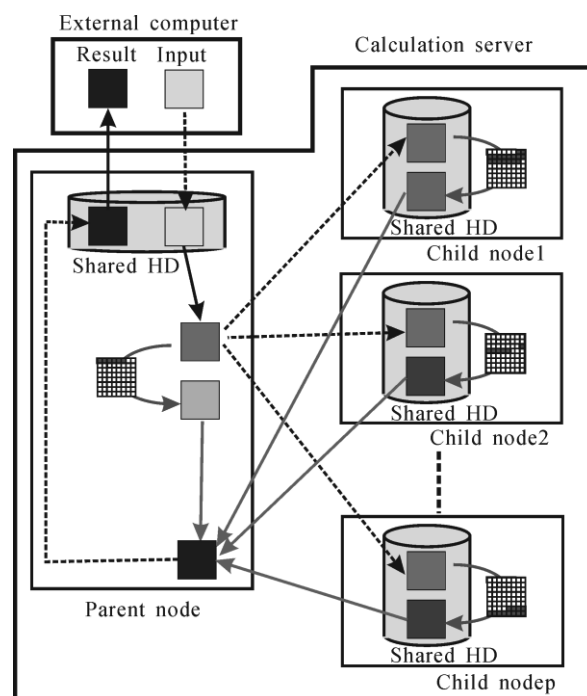


図 28 Processing flow of calculation server

理に関する特別な専門知識やソフトウェアがなくとも、容易に並列計算処理システムを構築することができる。

5. 2 位相差平均化手法への適用実験

簡易計算サーバを用いて位相差平均化手法を並列計算させる。親ノードと子ノードの接続には最高接続速度1 Gbpsの規格の1つである1000BASE-Tを使用した。親ノード1台、子ノード3台すべてにCPUがIntel Core 2 Duo E6600 2.4 GHz、メモリが1 GBのPCを使用した。並列処理に用いるコンピュータの台数 p に対して、ホログラムの分割数 n を等しく分散させる。こ

これは親ノード、子ノード4台すべての性能が等しいからであり、性能が等しくない場合は、個々のコンピュータの性能の違いによって、分散数を変える．コンピュータの台数 $p=1, 2, 3, 4$ ，ホログラムの分割数 $n=1, 4, 16, 64, 256, 1024$ と変化させたときの処理時間を計測する．処理対象は面外変位計測の光学系において、25 mmの片持ち梁の固定端から20 mmの位置に約0.5 μm の面外変位を加えたときの変位前後のホログラムとする．予め計算サーバ内の親ノードのメモリにホログラムのデータがあり、結果が親ノードのメモリに出力されるまでの時間を計測することにする．

処理時間の測定結果をTable 1に示し、得られた位相差分布を図29に示す．また得られた位相差分布の梁の中央水平方向1ラインを抜き出し、最小2乗法を用いて3次曲線を求めたものを理論曲線とする．この理論曲線との誤差の標準偏差をTable 2に示す．

ここで並列処理の評価をするために並列処理の高速化率と並列化効率を考える． p 台のコンピュータを用いて、並列処理したときの処理時間 $T(p)$ をとすると高速化率 $S(p)$ は、

$$S(p) = T(1) / T(p) \quad (6)$$

と表わせる．この指標は複数台のコンピュータを用いた場合と1台のコンピュータを用いた場合の速度比を示し、この値が大きいほど処理が高速化されたといえる．また並列化効率 $E(p)$ は、

$$E(p) = S(p) / p \quad (7)$$

と表わせる．この値が1に近いほど並列処理のオーバーヘッドが少なく、対象が並列処理に適した処理であるといえる．

式(6)と式(7)によって算出した高速化率および並列化効率を図30および図31にそれぞれ示す．4台のコンピュータを用いて、ホログラムの分割数が1024で処理させたときの高速化率は395.4 %，並列化効率は98.9 %となり、効率よく並列処理ができているといえる．

Table 1 Processing time

	Number of windows					
	1	4	16	64	256	1024
1 computers (s)	3.4	8.9	29.5	108.8	420.5	1654.2
2 computers (s)	-	5.8	16.1	56.1	212.8	833.5
3 computers (s)	-	6.2	12.9	39.5	143.3	555.9
4 computers (s)	-	5.1	10.0	30.3	108.6	418.3

Table 2 Standard deviation of error

Number of windows	1	4	16	64	256	1024
Standard deviation (nm)	16.39	4.02	1.95	1.09	0.78	0.67

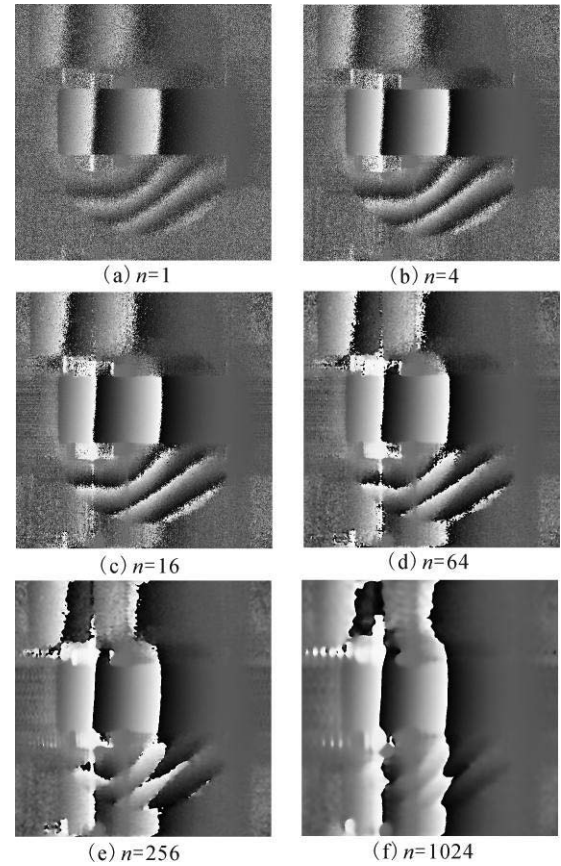


図 29 Phase-difference distribution by windowed holograms

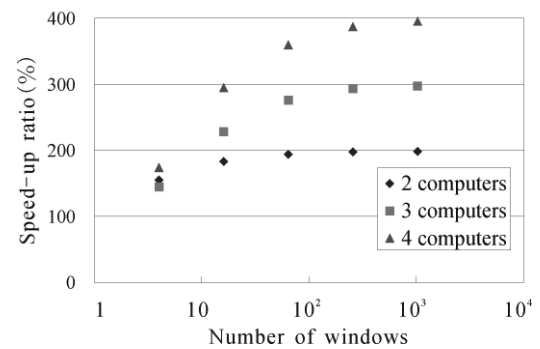


図 30 Speed-up ratio

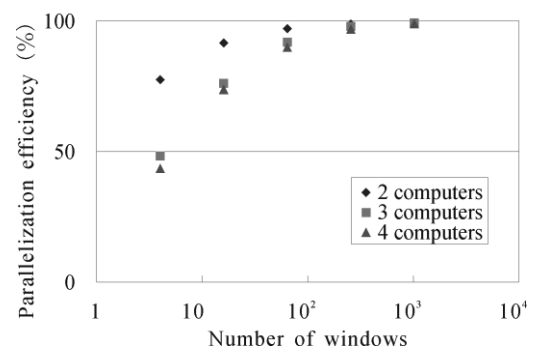


図 31 Parallelization efficiency

5. 3 ソフトウェアの改良

次のようにソフトウェアの改良を行った。

(1) ひずみ分布の波状ノイズの低減

ひずみを求める際の平滑化領域の縦横比を設定できるように改良し、波状ノイズの方向性をなくし、それによって低減することができた。

(2) キャリブレーション用ソフトウェア

キャリブレーションはこれまで長時間かけて行っていた。また、数十ナノメートル程度のゆらぎが発生するが、それを補正するための固定部材をキャリブレーション用基準平板の近くに設置した。それを用いて自動的に補正するようにソフトウェアを改良した。

6. おわりに

本研究を実施することによって、デジタルホログラフィを用いて三次元物体の形状計測を行う方法を実証することができた。試作装置についても、ソフトウェアを製作することによって、校正に必要な作業時間を大幅に短縮できて使いやすいものをつくった。これにより、試作装置をより実用的なものに近づけることができた。

予算面では、オンリーワンプロジェクトの他、科研や共同研究、近畿経済産業局の補助金などを利用させていただいた。

将来は、これまでの研究成果を応用して、従来行うことができなかったマイクロ構造物の材料特性、破断特性、亀裂進展、応力集中、などの特性評価や、自動車や航空機、ロケットのような大型の三次元構造物の微小変位分布やひずみ分布が計測できるようにしていきたい。今後、実用化をめざして、可能なコンソーシアムをつくり、企業や他の研究機関とも連携をとりながら研究を進めることや、実用化のための技術移転も進めていきたい。

研究業績一覧 (2006 年 4 月～2008 年 3 月)

(1) 論文

1. Morimoto, Y., Matsui, T., Fujigaki, M., and Kawagishi, N., Subnanometer Displacement Measurement by Averaging of Phase-difference in Windowed Digital Holographic interferometry, Optical Engineering, Vol. 46, No. 2, 025603(2007).
2. 藤垣元治, 足村陽平, 松井貴男, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィにおける再生像の標準偏差を用いた再生距離の同定, 実験力学, Vol. 7, No. 1, 29-33, (2007).
3. Fujigaki, M., Kita, T., Okazawa, S., Matui, T. and Morimoto, Y., Calibration Method with Reference Plane for Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry Using Spherical Wave, Journal of JSEM, Vol. 7, Special Issue, 74-77(2007).
4. Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Matsui, A., Three-dimensional Displacement Analysis by Windowed Phase-shifting Digital Holographic

Interferometry, Strain, Vol. 44, No. 1, 49-56(2008).

(2) 国際会議

1. Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Yamamoto, Y., Nano- and Pico-Meter Displacement Measurement by Phase Analysis of Fringe Patterns Obtained by Optical Method, (Keynote Lecture), Proceedings of ISEM, 2006.
2. Fujigaki, M., Kita, T., Okazawa, S., Matui, T. and Morimoto, Y., Calibration Method with Reference Plane for Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry Using Spherical Wave, Proceedings of ISEM, 55-58, 2006(CD-ROM).
3. Matsukawa, H., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., Development of Phase Shifting Device Using the Deflection of a Cantilever for Digital Holography, Proceedings of ICEM 2006 and ACEM5, Key Engineering Materials, Vols. 326-328, 19-22(2006).
4. Fujigaki, M., Kawagishi, N., Matui, T. and Morimoto, Y., Removal Method of Zero-order Diffraction Using Windowed Phase-shifting Digital Holography, Proceedings of the 2007 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, CD-ROM #269, (2007).
5. Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Kawagishi, N., Effects of Window Size on Accuracy and Spatial Resolution in Windowed Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry, Proceedings of ICEM13, Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, ed. E. E. Gdoutos, Springer, 593-594 (CD-ROM) (2007).
6. Morimoto, Y., Matui, T. and Fujigaki, M., Three-Dimensional Displacement Analysis by Windowed Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry, Proceedings of ICEM13, Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, ed. E. E. Gdoutos, Springer, 21-22 (CD-ROM) (2007).
7. Fujigaki, M., Ashimura, Y., Matui, T. and Morimoto, Y., Identification of Specimen Position and Orientation Using Standard Deviation of Intensity in Phase-Shifting Digital Holography, Proceedings of ICEM13, Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, ed. E. E. Gdoutos, Springer, 595-596(2007).
8. Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Matsui, A., Three-dimensional Displacement Measurements by Phase-shifting Digital Holographic Interferometry with Microscope, Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007(ATEM '07), JSME, OS1-1-4(CD-ROM), (2007).
9. Shiotani, K., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., Strain Measurement Method for Tilted Planar Object by Phase-shifting Digital Holography Combined with Grating Projection Method, Proceedings of 2nd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, #45(CD-ROM), (2007).
10. Kido, R., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y.,

Investigation into Cause of Wavy Noise on Strain Distribution in Phase-shifting Digital Holography, Proceedings of 2nd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, #48(CD-ROM), (2007).

11. Morimoto, Y., Matui, T. and Fujigaki, M., Subnanometer Displacement Measurement by Windowed Phase-shifting Digital Holographic Interferometry, Proceedings of ASPEN2007, (2007).

(3) 国内会議

1. 藤垣元治, 喜多俊行, 岡澤俊介, 松井徹, 森本吉春, 球面波を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法によるひずみ分布計測手法, 日本機械学会 M&M2006 材料力学カンファレンス講演論文集, No. 06-4, 345-346(2006).
2. 藤垣元治, 岡澤俊介, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィにおける格子投影法による形状計測, 2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 689-690(2006).
3. 川岸功和, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, デジタルホログラフィにおける位相ずれによる 0 次成分除去手法, 第 11 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 150-153, (2006).
4. 松井貴男, 森本吉春, 松井徹, 藤垣元治, 多光束同時入射型位相シフトデジタルホログラフィにおけるソフトウェアによる光軸調整手法, 第 11 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 10-13, (2006).
5. 藤垣元治, 川岸功和, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた変位分布計測におけるノイズ除去手法の限界, 日本機械学会関西支部第 7 回秋季技術交流フォーラム, (2006).
6. 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 川岸功和, 位相シフトデジタルホログラフィによる変位・ひずみ分布計測におけるノイズ除去の効果, 第 38 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, 日本非破壊検査協会, 115-120(2007).
7. 塩谷航平, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, 位相シフトデジタルホログラフィにおける格子投影形状計測法の面内変位計測光学系への適用, 日本機械学会関西学生会平成 18 年度卒業研究発表講演会前刷集, 6-19, (2007).
8. 木戸良介, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, 位相シフトデジタルホログラフィを用いたひずみ分布の波状ノイズ低減手法の検討, 日本機械学会関西学生会平成 18 年度卒業研究発表講演会前刷集, 6-20, (2007).
9. 木戸良介, 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィにおけるひずみ分布の波状ノイズ低減手法の検討, 第 3 回 NCP フォーラム, (2007).
10. 塩谷航平, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, 位相シフトデジタルホログラフィによる変位計測の三次元物体への適用, 第 3 回 NCP フォーラム, (2007).
11. 塩谷航平, 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法における並列計算の効果, 日本実験力学学会講演論文集, No. 7,

33-36(2007).

12. 木戸良介, 川岸功和, 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィにおける空間分解能の検討, 日本実験力学学会講演論文集, No. 7, 45-47(2007).
13. 藤垣元治, 田渕博之, 松井徹, 森本吉春, 学生が容易に使いこなせる画像計測研究用ソフトウェアの開発, 第 12 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 90-94(2007).
14. 塩谷航平, 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィの高さ分布計測への適用, 日本機械学会, M&M2007 カンファレンス CD-ROM 論文集, 675-676 (2007).
15. 藤垣元治, 森本吉春, 改造が容易な全視野計測研究用ソフトウェアの開発, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ(2007).
16. 恩田朋幸, 森本吉春, 松井徹, 藤垣元治, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィの時間平均干渉法への適用, 日本機械学会関西学生会平成 19 年度卒業研究発表講演会前刷集, 5-14(2008).
17. 久保田尚吾, 森本吉春, 松井徹, 藤垣元治, デジタルホログラフィにおけるレンズを用いた標準偏差による再生距離検出手法, 日本機械学会関西学生会平成 19 年度卒業研究発表講演会前刷集, 6-18(2008).

(4) 著書

1. 森本吉春, 藤垣元治, 実験力学ハンドブック (12.7 デジタルホログラフィ法), 日本実験力学学会, 井口学, 松井剛一, 横山隆 編, 194-199(2007).

(5) 講演会, 講習会, 展示会

1. 藤垣元治, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法による高精度 3 次元変形計測, 日本顕微鏡学会関西支部特別企画講演会, 電子顕微鏡機能イメージング法の展開「生物科学・材料科学におけるイメージングの統合化」, (2007).
2. 藤垣元治, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィによるサブナノメートル 3 次元変位計測, 計測自動制御学会・光波応用技術研究会, 3 次元光計測に関する研究会, (2007).
3. 森本吉春, 松井徹, 藤垣元治, 窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法による高精度三次元変形計測, 応用物理学学会関西支部講演会, (2007).
4. 藤垣元治, 画像計測による形状・変位分布・ひずみ分布の最新の計測手法, (社)日本非破壊検査協会関西支部平成 19 年度第 1 回技術サロン, (2007).
5. 藤垣元治, 全視野計測法による 実時間・高精度形状・変形・応力・ひずみ計測, 日本機械学会関西支部第 292 回講習会「応力計測の基礎とその応用(計測デモンストレーション付き)」, (2007).
6. 藤垣元治, 木戸良介, 塩谷航平, デジタルホログラフィの試作機の展示とデモンストレーション, 第 6 回産学官連携推進会議, 国立京都国際会館(2007).

デジタルホログラフィによる三光束同時入射 光学系を用いたひずみ分布計測の高速化

和歌山大学 システム工学部 ○藤垣元治, 森本吉春
和歌山大学 システム工学研究科 塩谷航平, 木戸良介

Speeding Up of Strain Distribution Measurement Using Simultaneous Three Beams by Phase-Shifting Digital Holography

Motoharu FUJIGAKI*, Yoshiharu MORIMOTO*,
Kohhei SHIOTANI** and Ryosuke KIDO**

Phase-shifting digital holography is a new method to measure the displacement and strain distribution on the surface of an object. One of the advantage of this method is that rough surface can be measured without any treatment such as polish. This method is suitable for practical use. We proposed a phase analysis method for composed waves using Fourier transform. We also proposed a calibration method with a reference plane to analyze deformation and strain distribution using spherical waves. In this paper, we apply these proposed methods for speeding up the strain distribution measurement.

Keywords: Phase-shifting digital holography, Simultaneous three beams, Speeding up of strain measurement

1. はじめに

位相シフトデジタルホログラフィ (PSDH: Phase-shifting Digital Holography) は, 表面処理なしに非接触で微小な変位分布やひずみ分布の計測ができる新しい手法である [1-4]. 我々はホログラムの一部でも再生画像の全体の情報をもっていることを利用して, ホログラムを分割し, 各ホログラムから得られた位相差の平均値を強度に比例した重みをもたせることにより変位を解析する位相差平均化手法を提案した [5-7]. この手法により, スペックルの影響を大幅に減らすことができ, 変位計測としては, サブナノメートルの分解能を実現した. 変位計測の分解能が向上することにより, 変位を微分して得られるひずみが有意な値として得られるようになり, 可搬型の変位分布・ひずみ分布計測システムを開発することができた [8]. 可搬型にすることによって, 溶接継手試験体の引っ張り試験に適用することができるようになった [9].

* Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama

** Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama

しかし、この可搬型の装置は、上下左右の4方向からの物体光がシャッターの切り替えによって順番に照射されているため、撮影に長い時間を要していた。我々はこれまでに、フーリエ変換位相シフト法を用いることによって、複数のピッチが合成された波を分離する手法を提案している[10]。また、物体に独立した3方向から照射された球面波を用いたデジタルホログラフィにおける基準面を利用したキャリブレーション方法を提案している[11]。

本研究では、これを利用し、3方向から同時に照射された物体光をフーリエ変換位相シフト法によって分離して、それぞれの光束ごとに得られた位相分布から物体表面のひずみ分布を求める手法を提案する。この手法では、光束ごとにシャッターで切り替える必要がないため、計測を高速化することができる。

2. 多光束同時解析原理

3光束の球面波を物体光として利用するデジタルホログラフィの光学系を図1に示す。まず、CH1の光束について見ると、レーザー光源から出た光は、ビームスプリッターで物体光と参照光に分けられる。物体光はレンズで広げられて球面波として物体に照射される。参照光はレンズで広げられた後に別のレンズによって平行光にされ、ピエゾステージに取り付けられたミラーで反射してCCDカメラに入射される。物体表面で反射した光と参照光がCCD表面で干渉することによってホログラムが撮影される。このとき、ピエゾステージを微小に変位させることにより、参照光の位相がシフトされ、ホログラムの各画素の干渉縞がそれに応じて変化することになる。CH2とCH3についても同様である。

CH1～CH3のレーザーを同時に発光させると、CCDには、それぞれのホログラムの強度が合成された（加算された）パターンが撮影されることになる。ここで、CH1の位相シフト量が $2\pi/7$ ごとに1枚の画像を撮影するとする。CH2はCH1の2倍の位相シフトが行なわれ、

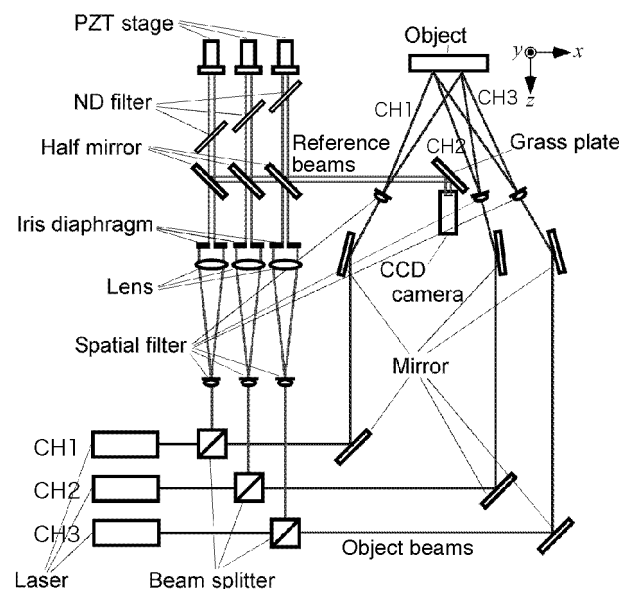


Fig. 1 Optical setup for digital holography using simultaneous three beams

CH3はCH1の3倍の位相シフトが行なわれるとする．図2に，この場合のある1画素の輝度変化を示す．図2において，太線がその画素における強度の変化を表し，7枚画像を撮影すると，黒点で示した7個の強度が得られることになる．

これをフーリエ変換すると，図3に示すようなスペクトルが得られる．7点のデータのフーリエ変換であるため，周波数-3から+3までの7個のスペクトルとなる．ここで，周波数1, 2, 3の成分がそれぞれCH1, CH2, CH3の成分となるため，それぞれを抽出して，その実部と虚部から位相を求めると，CH1, CH2, CH3における初期位相（位相シフト量が0のときの位相値）が得られることになる．このようにすることで，3光束が同時に照射される光学系を使っても，7枚の位相シフト画像から，それぞれの成分を分離することが可能となる．

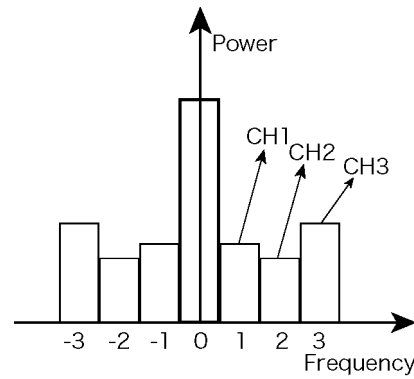
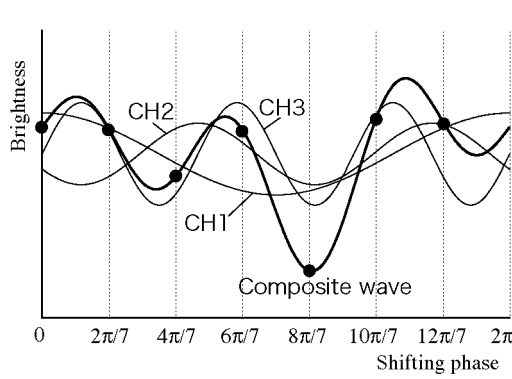


Fig. 2 Brightness change of composite wave Fig. 3 Fourier spectrum of composite wave

3. 感度マトリックスによるひずみ算出手法

物体上のある点 P に，入射角 θ で光を照射したとき，観測場所によって物体からの反射光の強度に違いが生じる．その反射光の感度方向である感度ベクトル \mathbf{e} は，物体の変位ベクトル \mathbf{d} と変形によって生じる位相差 $\Delta\phi$ を用いると式(1)のように表すことができる．

$$\Delta\phi(P) = \mathbf{e}(P) \cdot \mathbf{d}(P) \quad (1)$$

1 方向からの入射光に対して，変位ベクトルと感度ベクトルともに x, y, z 方向に成分を持っているため

$$\Delta\phi = \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = e_x d_x + e_y d_y + e_z d_z \quad (2)$$

となる．3 方向から光を照射すると，それぞれの入射光に対する感度ベクトル成分のパラメータが増える．このことから式(2)は式(3)のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで，添え字の 1, 2, 3 は 3 つの入射光を意味する．

□

右辺の感度ベクトル行列を感度マトリックスと呼ぶ．これを S とすると，3つの光束における変形によって生じる位相差 $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$, $\Delta\phi_3$ と x , y , z 方向の変位 d_x , d_y , d_z との関係は，

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる．ここで，

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

とすると式(4)は，

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となり， x , y 方向の変位は，

$$d_x = f_{1x}\Delta\phi_1 + f_{2x}\Delta\phi_2 + f_{3x}\Delta\phi_3 \quad (7)$$

$$d_y = f_{1y}\Delta\phi_1 + f_{2y}\Delta\phi_2 + f_{3y}\Delta\phi_3 \quad (8)$$

となる．式(7), (8)を x と y で偏微分すると，引張ひずみ ε_x , ε_y , せん断ひずみ γ_{xy} は，

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_x}{\partial x} = f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial d_y}{\partial y} = f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial d_x}{\partial y} + \frac{\partial d_y}{\partial x} = f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} + f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (11)$$

となる．このようにすることで，あらかじめ式(5)に示す感度マトリックスの逆行列を得ておくことで，各光束における変形前後の位相差からひずみ分布を求めることができる．

4. ひずみ分布計測実験

上述の手法を用いて片持ち梁を変形させたときのひずみ分布の計測を行なった．図4に計測試料を示す．試料はアルミニウム製で，20mm幅の床に固定された部材の上部に，断面が5mm角，長さ22.5mmの片持ち梁がある．梁の付け根から20mmの位置で，1 μ mの変位を図の矢印の向きに加え，変形させた．

光学系として，図1に示すものを用いた．3光束を同時に照射し， $2\pi/7$ ずつ位相シフトを行ないながら7枚のデジタルホログラムを撮影した．撮影に要した時間は約0.5秒であった．変形前後において，同様にデジタルホログラムを撮影し，上述のフーリエ変換位相シフト法によって，CH1, CH2, CH3の成分を分離し，それぞれの位相値を求めた．

変形前後の CH1, CH2, CH3 の位相差分布をそれぞれ図 5(a), (b), (c)に示す．位相差分布は，16 分割の窓関数を用いたスペckルノイズ低減手法[7]を用いて求めた．位相差分布の各画素に対して，周辺の 15 画素×9 画素の領域の位相差を平面近似することで，位相差の勾配を求める．得られた値とあらかじめ 3 軸ピエゾステージに取り付けられた基準面を用いて得ておいた感度マトリックスを用いて，式(9)により求めた x 方向のひずみの分布を図 6 に示す．

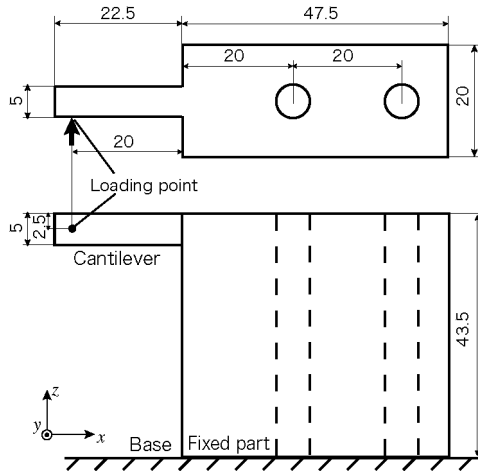
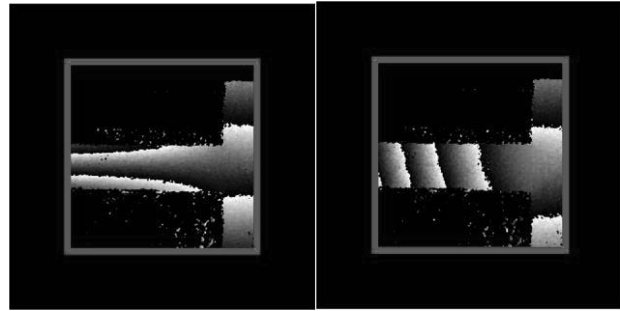
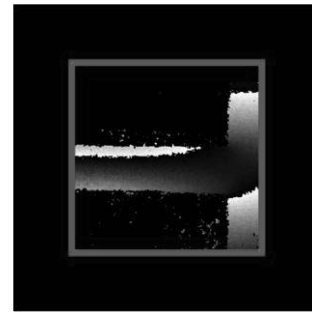


Fig. 4 Specimen



(a) CH1

(b) CH2



(c) CH3

Fig. 5 Phase distribution

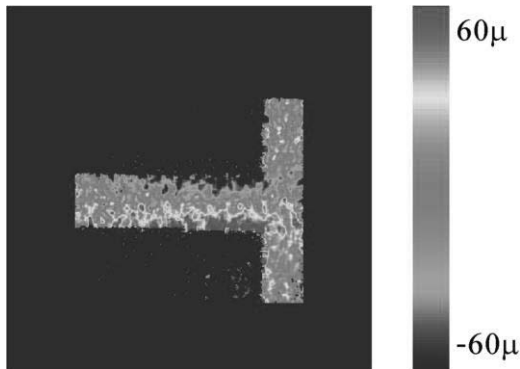


Fig. 6 Strain distribution for x -direction

5. おわりに

本研究では，物体光を独立した 3 方向から同時に照射することで，短時間に撮影する手法を提案した．フーリエ変換位相シフト法を用いることで，7 枚の位相シフトされたデジタルホログラムから，それぞれの光束ごとの成分を分離して位相値を求めることができる．これまでに開発した可搬型の装置の場合は，光束ごとにシャッターで切り替える必要があったために約 16 秒の撮影時間が必要であったのに対して，約 0.5 秒で撮影を行なうことができるようになった．なお，本研究の一部は，近畿経済産業局の平成 16 年度地域新規産業創造技術開発費補助金（代表：日立造船株式会社）を用いて行なった．関係諸氏に感謝する．

参考文献

- [1] Yamaguchi, I. and Zhang, T., Phase-shifting Digital Holography, Opt. Lett., 22-16 (1997), 1268-1270.
- [2] 山口一郎, デジタルホログラフィー, 0 plus E, 23-1 (2001), 103-107.
- [3] Yamaguchi, I. Kato, J. and Matsuzaki, H., Measurement of Surface Shape and Deformation by Phase-shifting Image Digital Holography, Opt. Eng., 42-5 (2003), 1267-1271.
- [4] 高橋功, 森本吉春, 野村孝徳, 米山聡, 藤垣元治, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測, 実験力学, 3-2, (2003), 98-102.
- [5] Morimoto, Y., Nomura, T., Fujigaki, M., Yoneyama, S., and Takahashi, I., Deformation Measurement by Phase-shifting Digital Holography, Proc. of the 2003 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, SEM, (2003). 123-130.
- [6] Morimoto, Y., Nomura, T., Fujigaki, M. and Takahashi, I., Reduction of Speckle Noise Effect by Divided Holograms, Proceedings of 12th International Conference on Experimental Mechanics(ICEM12), (2004)., 554-555.
- [7] Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Kawagishi, N., Effect of Weight on Averaging of Phases in Windowed Digital Holographic Interferometry for Pico-meter Displacement Measurement, ISOT2005 in Sapporo, SPIE(2005), 111-120.
- [8] 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 北側彰一, 中谷光良, 目黒栄, 位相シフトデジタルホログラフィ干渉法を用いた可搬型ひずみ分布計測システムの開発, 第 37 回応力・ひずみ測定シンポジウム講演論文集, (2006), 143-146.
- [9] 中谷光良, 堅多達也, 北側彰一, 石原照久, 芦田吏史, 森本吉春, 藤垣元治, 光学式ひずみ分布計測による溶接継手応力集中部の検出, 第 37 回応力・ひずみ測定シンポジウム講演論文集, (2006), 137-142.
- [10] 岡澤俊介, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, フーリエ変換位相シフト法による位相シフトデジタルホログラフィの多光束同時解析, 日本実験力学会講演論文集, No. 6, (2006), 33-38.
- [11] Fujigaki, M., Kita, T., Okazawa, S., Matui, T. and Morimoto, Y., Calibration Method with Reference Plane for Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry Using Spherical Wave, Journal of JSEM, Vol. 7, Special Issue, (2007), 74-77.

位相シフトデジタルホログラフィによるサブナノメートル3次元変位計測

和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科

藤垣元治, 森本吉春

fujigaki@sys.wakayama-u.ac.jp

1. はじめに

変位やひずみ, 空間座標などを撮影領域における分布として得る手法は, 実験力学分野では全視野計測法と呼ばれている[1]. レーザ干渉法のような光学的な手法と組み合わせ, その解析手法を工夫することにより, 非接触で高精度, 高速な計測が可能となる. 3次元形状や変位, ひずみ分布を計測することによって, 工業生産物の製品検査や構造物の健全性評価を行なうことができる.

解析手法としては, 用途に応じて, 格子投影による形状変形計測, 干渉縞解析による微小変形計測, モアレ干渉法によるひずみ計測, 光弾性による応力解析などがある. これらは格子画像の位相解析を行うことで計測精度を向上させることが可能である.

ナノメートルからマイクロメートル程度の微小な変位分布やひずみ分布を計測する手法として, 近年, 位相シフトデジタルホログラフィ干渉法が開発された[2][3]. しかし従来のデジタルホログラフィでは, スペックルノイズが現れるために, 精度のよい変位計測結果を得ることができなかった. 筆者の研究グループでは, スペックルの発生メカニズムを積極的に利用することにより, 逆にスペックルノイズをほぼ完璧に除去する手法を新たに開発した[4-6]. それにより, デジタルホログラフィを用いてサブナノメートル (1000 万分の1ミリメートル) の分解能で変位分布が計測できるようになった.

本稿では, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外・面内変位分布とひずみ分布の計測手法[7][8][9], 窓関数を用いたノイズ除去手法[4-6]を述べ, それらの手法を用いて開発した可搬型3次元変位分布・ひずみ分布計測装置を紹介する[10][11]. さらに, 小型化・高速化するための技術として開発した再生像の標準偏差を用いた再生距離の同定手法[12], 球面波による3次元変位・ひずみ分布計測手法[13][14], 3光束同時入射とその分離手法[15]について紹介する.

2. 位相シフトデジタルホログラフィによる微小変位分布・ひずみ分布計測

位相シフトデジタルホログラフィは, CCDなどの撮像素子面において物体から反射してきた物体光と参照光とがつくる干渉縞をホログラムとして記

録し, 得られた画像から光の伝播公式を用いて対象物の位置における強度分布を再生する手法である[2]. 再生された像として, 対象物表面における光の強度と位相の分布が得られる. 対象物が微小に変位した場合は, 変形による光路長の差が位相の差として得られたため, 位相の差から変位量を知ることができる[7][8]. 対象物への入射光に角度を持たせることで, 面内変位も計測することができる[9].

2.1 位相シフトデジタルホログラフィの再生原理

図1に位相シフトデジタルホログラフィの光学系の一例としてトワイマングリーン形の装置の概略図を示す. CCD面 (ホログラム面) の各画素の座標(X, Y)にされる干渉縞の強度を $I(X, Y, \alpha)$ とする. ここで, α はPZTステージに取り付けたミラーによりシフトさせる参照光の位相シフト量で, $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ である. CCD面における干渉縞の振幅 $a_0(X, Y)$ と位相 $\Phi_0(X, Y)$ を以下のように求めることができる.

$$a_0(X, Y) = \frac{\sqrt{\{I(X, Y, 0) - I(X, Y, \pi)\}^2 + \{I(X, Y, \frac{3\pi}{2}) - I(X, Y, \frac{\pi}{2})\}^2}}{4} \quad (1)$$

$$\tan \Phi_0(X, Y) = \frac{I(X, Y, \frac{3\pi}{2}) - I(X, Y, \frac{\pi}{2})}{I(X, Y, 0) - I(X, Y, \pi)} \quad (2)$$

これらの振幅と位相よりCCD面での複素振幅分布 $g(X, Y)$ を求めると次式のようにになる.

$$g(X, Y) = a_0(X, Y) \exp i \Phi_0(X, Y) \quad (3)$$

CCD面における干渉縞の複素振幅分布を物体の置いていた地点である再生面までフレネル回折積分することで元の物体の複素振幅分布を求めることができる. このフレネル回折積分の式を以下に示す.

$$u(x, y) = \exp \left\{ i k \frac{(x^2 + y^2)}{2R} \right\} f \left[g(X, Y) \exp \left\{ i k \frac{(X^2 + Y^2)}{2R} \right\} \right] \quad (4)$$

ここで, 光軸はCCD面に垂直で, (X, Y)座標の原点を通っている. 再生面も光軸に垂直で, 光軸の位置を原点とする座標(x, y)で表す. $u(x, y)$ は再生面での複素振幅分布, R はCCD面と再生面の距離, k は波数, f はフーリエ変換を表す演算子である. この再生面の

複素振幅分布の強度を求めることで再生像を得ることができる。

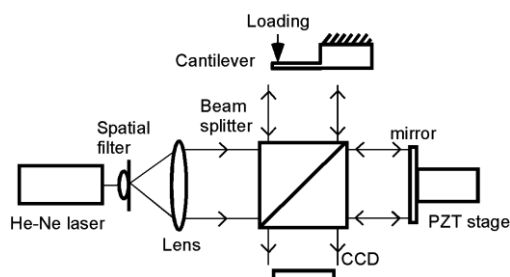


図1 位相シフトデジタルホログラフィの光学系の例

2.2 面内変位・面外変位の計測手法

本節では、2 光束を用いた面内変位計測の計測原理について述べる。2 光束を用いて変位を計測するための光学系を図 2 に示す。物体光として 2 方向から平行光を照射する。参照光はガラス基板の反射によって CCD に正面から入射させる。また、物体表面からの散乱光はガラス基板を透過して CCD 表面に到達し、参照光との干渉による明暗のパターン（ホログラム）が CCD に記録される。

2 方向から照射される光の物体への入射角をそれぞれ θ , $-\theta$ とする。それぞれの方向からの光に対して、物体が変位することで生じる位相差をそれぞれ $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ とする。波長を λ , 物体の変位の x 方向成分を d_x , z 方向成分を d_z とすると、それぞれ次の関係式となり、面内変位と面外変位を求めることができる。

$$d_x = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{(\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2)}{\sin\theta}, \quad d_z = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{(\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2)}{\cos\theta + 1} \quad (5)$$

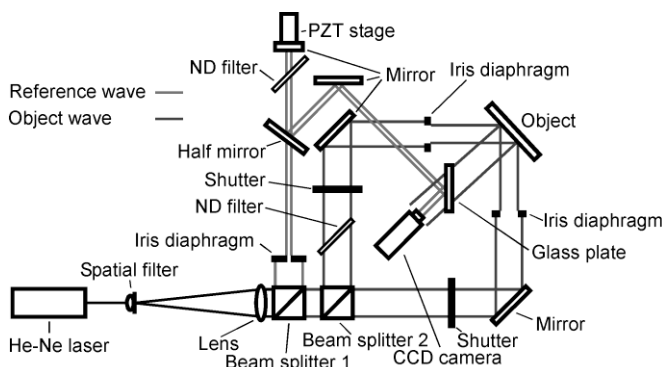


図2 平行 2 光束による面内・面外変位計測光学系

2.3 窓関数を用いたノイズ除去手法

デジタルホログラムに窓関数をかけて再生すると再生像におけるスペックルの発生位置が移動する。スペックルの輝度が高いところはノイズが少ないという特徴がある。そこで、デジタルホログラムに窓関数をかけて再生して複数個の再生画像を得

て、得られた複数の再生画像の同一画素のデータに対して、輝度が高いところに重みをもたせて組み合わせることでノイズを減らす手法を開発した[4-6]。この手法を片持ち梁の面外変位計測に適用した例を図 3 に示す。分割数とは窓関数の個数のことであり、分割数を増やして行くにしたがって、ノイズが低減されている。この例の場合、当初 16.4 nm あった理論値との差の標準偏差が分割数 16 の場合は 1.95nm になり、分割数を 1024 まで増やせば 1nm 以下になっているのわかる。図 3 の例は面外変形であるが、同様に面内変形のノイズ除去にも有効である。

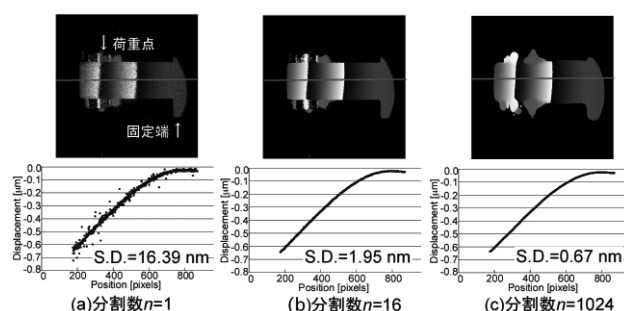
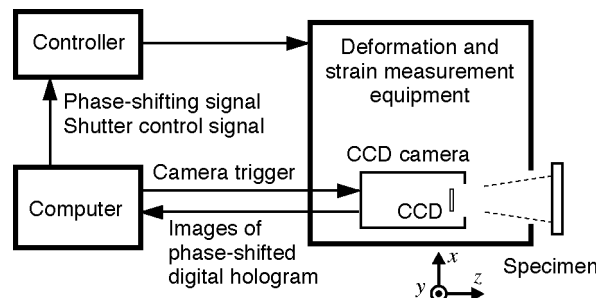
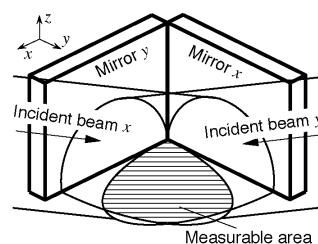


図3 窓関数を用いたスペックルノイズ除去



(a) ブロック図



(b) ミラーの反射を利用した 2 光束入射方法



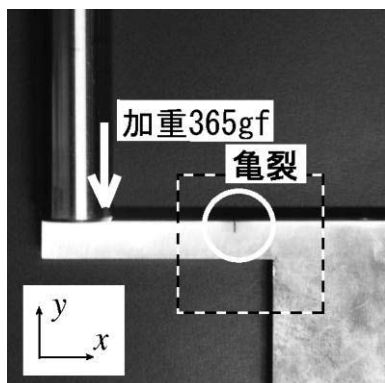
(c) 写真

図4 可搬型 3 次元変位分布・ひずみ分布計測装置

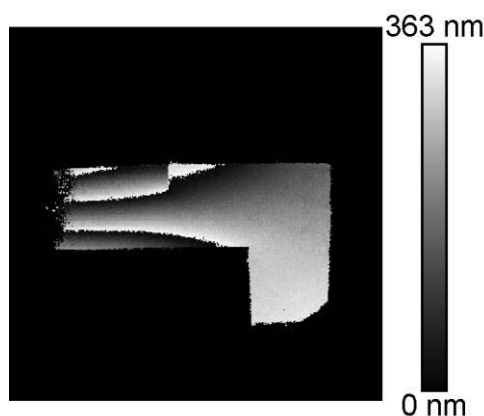
2.4 可搬型3次元変位分布・ひずみ分布計測装置の開発[10]

図4に開発した装置のブロック図と写真を示す。内部の光学系は図1の光学系と同様のものが組み込まれている。ただし、光学系を簡単にするため、図4(b)に示すように、ミラーの反射を利用して1つの平行光から2光束を作成している。計測可能領域は、 x 方向と y 方向の光が共通して照射されている斜線部の領域となる。

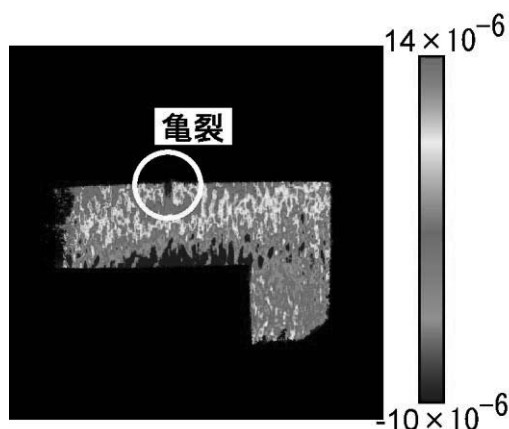
主な仕様は次の通りである。計測領域：30mm×



(a) 試料



(b) 変位分布 (x 方向)



(c) ひずみ分布 (x 方向)

図5 変位分布計測例 (片持ち梁)

30mm, 計測分解能：(変位)1nm 以下, (ひずみ) 5×10^{-6} Strain(鋼材で1MPa), 重量：約10kg, サイズ：約250mm×250mm×250mm。

2.5 ひずみ分布計測への応用

本手法により対象物体の変形前後において面内変位分布を精度よく求め、そのデータに対して面内方向に微分を行うことでひずみ分布を得ることができる[10][11]。図5は、長さ60mm、断面10mm角のアルミ製の片持ち梁の先端部に約360gのおもりを載せたときの x 方向の変位分布とひずみ分布の計測例である。片持ち梁の上部には人工の亀裂がついている。変位分布やひずみ分布を見ると亀裂があることがわかる。

3. 再生像の標準偏差を用いた再生距離の同定[12]

位相シフトデジタルホログラフィにおいて、再生計算によって得られる再生像は、記録面から再生距離だけ離れた位置における複素振幅の分布である。再生距離が実際の物体までの光学距離と異なる場合は、その分だけフォーカスがずれた再生像が得られることになる。

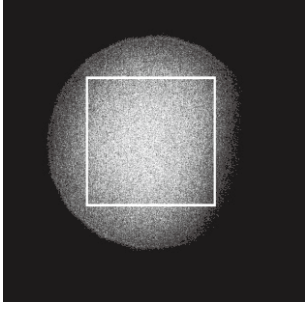
物体表面が散乱面である場合は、そこにスペックルパターンが発生する。図6に再生像に現れたスペックルパターンの例を示す。

再生像の強度の標準偏差 P_S は再生像における標準偏差を求める領域の画素数を N 、その領域での平均強度を \bar{P}_A 、各画素での強度を P_i とすると次式のように表すことができる。

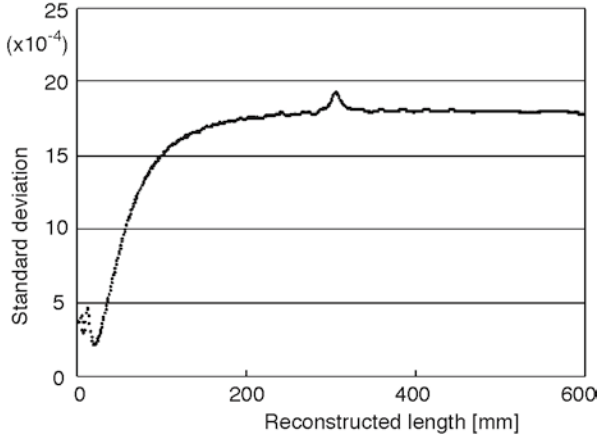
$$\sigma P_S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (P_i - \bar{P}_A)^2} \quad (6)$$

この標準偏差の値は、スペックルパターンのコントラストや領域内の輝度分布のむらによって変化する。また、再生距離を変えることによっても変化する。再生距離が実際の光学距離に一致するときには極大となる性質があることを実験的に見いだした。このことを利用すれば、再生距離を少しずつ変えながら標準偏差を計算し、それが極大となる位置を見つけることで実際の光学距離を求めることが可能となる。

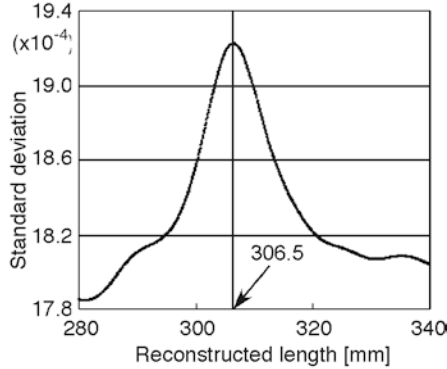
再生距離を0.1mmずつ変えて繰り返し再生計算を行い、それぞれの再生距離ごとに上記解析領域における標準偏差を求めた結果を図6に示す。図6(a)には、平面を撮影したときに得られた再生像を示す。白枠の内部について強度の標準偏差を求めたものを図6(b)に示す。図6(c)にはその極大付近を抜き出したものを示す。これより標準偏差が極大となる再生距離は306.5 mmとなり、実測値とほぼ一致した。



(a) 再生像



(b) 再生距離を変えて計算した場合の標準偏差



(c) (b)の極大値付近

図6 再生距離と標準偏差の関係

4. 球面波による3次元変位・ひずみ分布計測手法

[13][14]

4.1 位相差と変位の関係

計測物体にある角度から光を照射したときの光源と観測面の位置関係を図7に示す。ある物体上の点Pに、入射角 θ で光を照射したとき、観測場所によって物体からの反射光の強度に違いが生じる。点Pにおいて、その反射光の感度方向である感度ベクトル \mathbf{e} は、物体の変位ベクトル \mathbf{d} と変形によって生じる位相差 $\Delta\phi$ を用いると式(7)のように表すことができる。

$$\Delta\phi = \mathbf{e} \cdot \mathbf{d} \quad (7)$$

1方向からの入射光に対して、変位ベクトルと感度ベクトルともに x , y , z 方向に成分を持っているため、

$$\Delta\phi = \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = e_x d_x + e_y d_y + e_z d_z \quad (8)$$

となる。3方向から光を照射すると、それぞれの入射光ごとに対応する感度ベクトル成分のパラメータが得られる。このことから式(8)は式(9)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、添え字の1, 2, 3は各入射光を意味する。また、右辺の行列を感度マトリックスと呼ぶ。

上式右辺の行列の各成分がわかっているならば、各入射光における位相差 $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$, $\Delta\phi_3$ から変位成分 d_x , d_y , d_z をそれぞれ求めることができる。

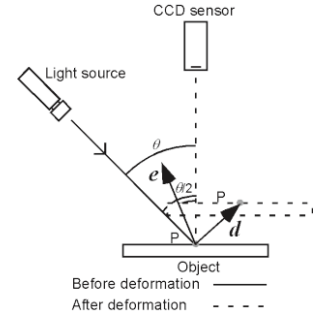


図7 感度ベクトルの方向

4.2 基準面を用いた校正手法

式(9)右辺の行列の各成分の値を求めるために、基準面を用いた校正手法を提案する。基準面は図2に示すように3軸ピエゾステージに取り付けられ、 x , y , z 方向にそれぞれ任意の微小量だけ平行移動させることができる。基準面は計測対象物と同じ位置に設置し、基準面には3方向からの球面波がそれぞれ照射される。

基準面上のある1点について考えると、まず、基準面を x 方向に Δx だけ移動させた時に、それぞれの光源ごとに位相差 $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$, $\Delta\phi_3$ を求めると、式(9)における感度マトリックスの成分 e_{1x} , e_{2x} , e_{3x} はそれぞれ $\Delta\phi_1/\Delta x$, $\Delta\phi_2/\Delta x$, $\Delta\phi_3/\Delta x$ として得ることができる。同様に y 方向, z 方向に基準面を移動させることですべての感度マトリックスの成分を得ることができる。再生像のすべての画素ごとに感度マトリックスの成分を求めてテーブル化しておくことで、球面波

であっても容易に位相差から変位量を得ることが可能となる。

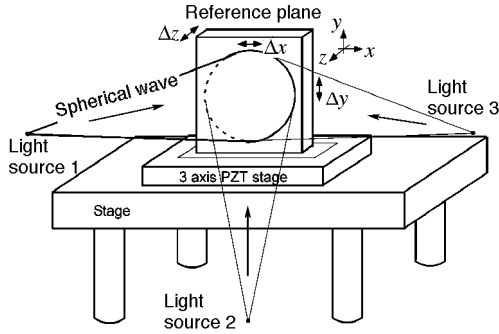


図8 画素ごとの校正データ取得のための3軸ピエゾステージを用いた基準物体

4.3 ひずみ分布導出手法

式(9)右辺の行列を S として、その逆行列の各要素を式(10)のように表す。

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

すると、 x , y 方向の変位 d_x と d_y は、それぞれ次のように表すことができる

$$d_x = f_{1x}\Delta\phi_1 + f_{2x}\Delta\phi_2 + f_{3x}\Delta\phi_3 \quad (11)$$

$$d_y = f_{1y}\Delta\phi_1 + f_{2y}\Delta\phi_2 + f_{3y}\Delta\phi_3 \quad (12)$$

これらを偏微分することで、引張ひずみ ε_x , ε_y , せん断ひずみ γ_{xy} は、それぞれ次のように表せる。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_x}{\partial x} = f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (13)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial d_y}{\partial y} = f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} \quad (14)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial d_x}{\partial y} + \frac{\partial d_y}{\partial x} = f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} + f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (15)$$

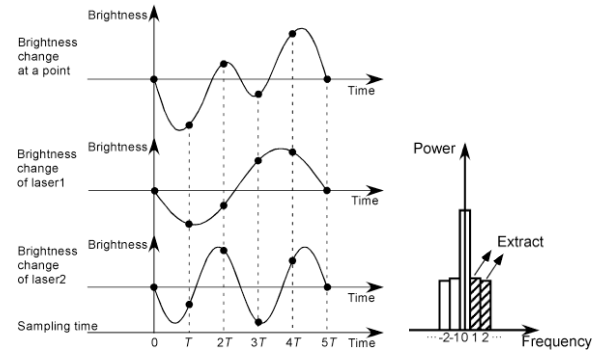
すなわち、式(13)～(15)を用いることで、位相差分布からひずみ分布を得ることができる。

4.4 3光束同時入射とその分離手法[15]

計測時間の短縮のためには、シャッターによる切り替えなしに、3光束のレーザーを同時に計測試料に照射し、撮影された画像から3光束の成分をそれ

ぞれ分離して抽出することが必要になる。

各成分の分離にフーリエ変換を用いる手法を提案する。図9(a)には、5枚の撮影に対して位相シフト量がそれぞれ 2π および 4π である2成分が混ざった干渉縞の輝度を模式的に描いている。混ざった輝度の変化をフーリエ変換すると、図9(b)に示されるように周波数1と2にそれぞれの成分が現れる。そのため、それぞれを抽出して位相解析を行うことで、各成分が分離された位相情報が得られることになる。3光束の場合も同様に、1周期あたりの位相シフト量がそれぞれ、 2π および 4π , 6π となる3光束を1周期で7枚撮影することで、3光束の成分を分離することができる。



(a) 1点の明るさ変化 (b) パワースペクトラム
図9 フーリエ変換による多光束成分の分離手法

4.5 ひずみ分布計測実験

上述の手法を用いて片持ち梁を変形させたときのひずみ分布の計測を行なった。図10に計測試料を示す。試料はアルミニウム製で、20mm幅の床に固定された部材の上部に、断面が5mm角、長さ22.5mmの片持ち梁がある。梁の付け根から20mmの位置で、1mmの変位を図の矢印の向きに加え、変形させた。

光学系として、図11に示すものを用いた。3光束を同時に照射し、 $2\pi/7$ ずつ位相シフトを行ないながら7枚のデジタルホログラムを撮影した。撮影に要した時間は約0.5秒であった。変形前後において、同様にデジタルホログラムを撮影し、上述のフーリエ変換位相シフト法によって、CH1, CH2, CH3の成分を分離し、それぞれの位相値を求めた。

変形前後のCH1, CH2, CH3の位相差分布をそれぞれ図12(a), (b), (c)に示す。位相差分布は、16分割の窓関数を用いたスペクルノイズ低減手法[7]を用いて求めた。位相差分布の各画素に対して、周辺の15画素×9画素の領域の位相差を平面近似することで、位相差の勾配を求める。得られた値とあらかじめ3軸ピエゾステージに取り付けられた基準面を用いて得ておいた感度マトリックスを用いて、式(13)により求めた x 方向のひずみの分布を図13に示す。

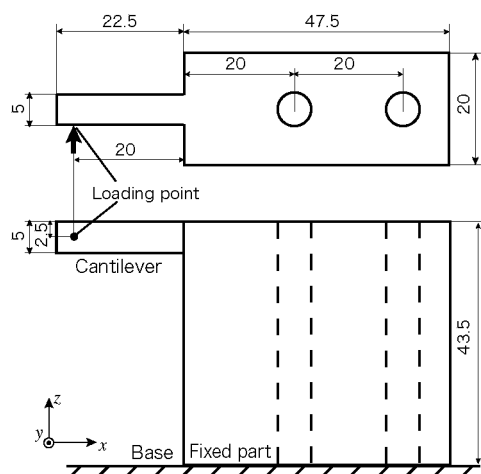


図 10 試験片

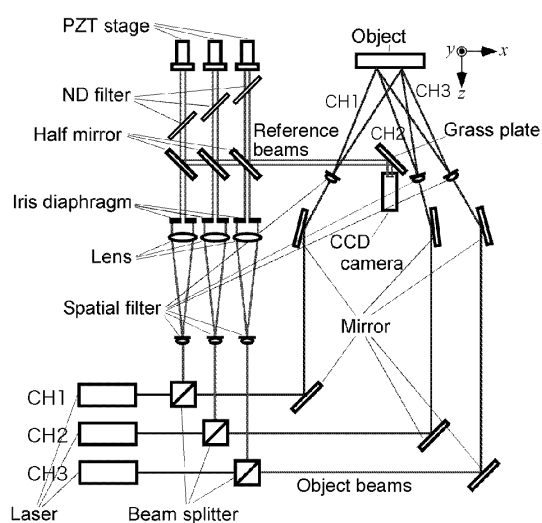


図 11 3 光束球面波を同時照射するデジタルホログラフィ光学系

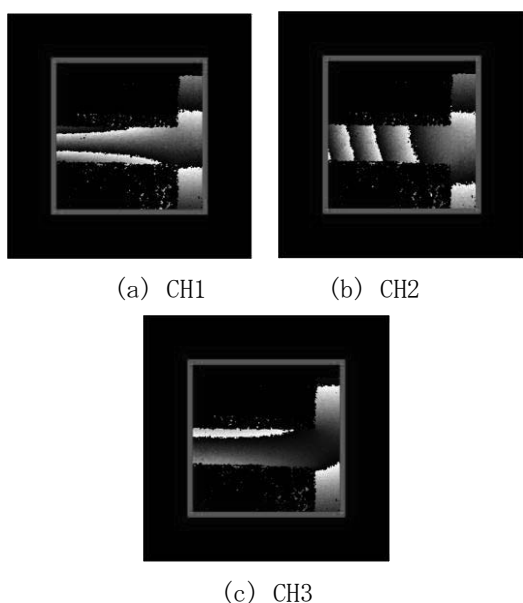


図 12 各光束ごとの変形前後の位相差分布

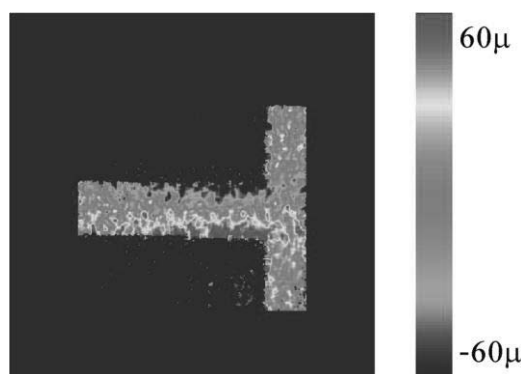


図 13 ひずみ分布 (x 方向)

5. おわりに

微小な変位分布計測およびひずみ分布計測技術として、位相シフトデジタルホログラフィを用いる手法の概要を述べた。本手法は、小型化することで光学実験台上でなくても利用できる振動に強い可搬型で実用的な計測装置とすることができる。本手法は、粗面であれば表面処理なしに微小変位分布やひずみ分布計測が高精度に計測できるため適用範囲が広く、今後ますます発展していくと予想している。現在、小型化や高速化、顕微鏡内で使うための手法、新しいキャリブレーション手法などの技術開発を進めているところである。

参考文献

- [1] 横山隆, 松井剛一, 井口学 編, よくわかる実験技術・学術用語, 日本実験力学会, (2006).
- [2] Yamaguchi, I. and Zhang, T., Phase-shifting Digital Holography, Optical Letter, 22-16, 1268-1270 (1997).
- [3] Zhang, T. and Yamaguchi, I.: Three-dimensional Microscopy with Phase-shifting Digital Holography, Opt. Lett., 23-15, 1221-1223 (1998).
- [4] Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M., Kawagishi, K., Accurate Displacement Measurement by Windowed Holograms in Digital Holographic Interferometry, 2005 SEM Annual Conf. and Exposition on Exp. and Applied Mechanics, #418 (CD-ROM), (2005).
- [5] Morimoto, Y., Matui, T., Fujigaki, M. and Yamamoto, Y., Nano- and Pico-Meter Displacement Measurement by Phase Analysis of Fringe Patterns Obtained by Optical Method, (Keynote Lecture), Proceedings of ISEM, (2006).
- [6] Morimoto, Y., Matsui, T., Fujigaki, M., and Kawagishi, N., Subnanometer Displacement Measurement by Averaging of Phase-difference in Windowed Digital Holographic interferometry, Optical Engineering, 46-2, 025603 (2007).
- [7] 高橋功, 森本吉春, 野村孝徳, 米山聡, 藤垣元治, 位

- 相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測, 実験力学, 3-2, 98-102(2003).
- [8] Morimoto, Y., Nomura, T., Fujigaki, M., Yoneyama, S. and Takahashi, I., Deformation Measurement by Phase-shifting Digital Holography, Experimental Mechanics, 45-1, 65-70, (2005).
- [9] 岡澤俊介, 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外・面内変位同時計測, 日本実験力学会講演論文集 2005 年度年次講演会, 108-112(2005).
- [10] 藤垣元治, 松井徹, 森本吉春, 北側彰一, 中谷光良, 目黒栄, 位相シフトデジタルホログラフィ干渉法を用いた可搬型ひずみ分布計測システムの開発, 第 37 回応力・ひずみ測定シンポジウム講演論文集, 143-146(2006).
- [11] 藤垣元治, 喜多俊行, 松井徹, 森本吉春, 石原照久, 北側彰一, 移動窓関数を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法によるひずみ分布計測, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集, No. 05-9, 131-132(2005).
- [12] 藤垣元治, 足村陽平, 松井貴男, 松井徹, 森本吉春, 位相シフトデジタルホログラフィにおける再生像の標準偏差を用いた再生距離の同定, 実験力学, Vol. 7, No. 1, 29-33, (2007).
- [13] Fujigaki, M., Kita, T., Okazawa, S., Matui, T. and Morimoto, Y., Calibration Method with Reference Plane for Phase-Shifting Digital Holographic Interferometry Using Spherical Wave, Journal of JSEM, Vol. 7, Special Issue, 74-77(2007).
- [14] 藤垣元治, 喜多俊行, 岡澤俊介, 松井徹, 森本吉春, 球面波を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法によるひずみ分布計測手法, 日本機械学会 M&M2006 材料力学カンファレンス講演論文集, No. 06-4, 345-346(2006).
- [15] 岡澤俊介, 森本吉春, 藤垣元治, 松井徹, フーリエ変換位相シフト法による位相シフトデジタルホログラフィの多光束同時解析, 日本実験力学会講演論文集, No. 6, 33-38(2006).